

44-51

天水地震区综合地球物理剖面 的建立与壳幔结构

p 315.2

p 183.2

郭守年 董治平 蒋梅 廖泽富

(国家地震局兰州地震研究所, 兰州 730000)

摘要 根据人工地震、重力、大地电磁和地热资料,在天水地震区建立了二个综合地球物理剖面.对这两个剖面进行了分析,研究了该地区的壳幔结构.结果表明,沿西秦岭北缘断裂带,地壳变薄,低速层、低密层和低阻层同步出现,同时在断裂带附近形成了宽几十到上百公里的相变过渡带,其影响深度可达上地幔.

主题词: 甘肃 地球物理剖面 壳幔结构 天水地震区;天水市

1 引言

一些地球物理反演方法在单独应用时往往存在着非唯一性或多解性的问题.其原因来自两个方面:

其一是一些地球物理方法本身的局限.例如重力,只要在体积 V 中存在某种质量分布 $\sigma(X, Y, Z)$ 能满足:

$$\iiint U(X, Y, Z) \sigma(X, Y, Z) dV = 0 \quad (1)$$

则附加质量将不产生外部场.这里 $U(X, Y, Z)$ 是体积 V 中的任意调和函数,在界面上是连续函数.因而有无穷多组 $\sigma(X, Y, Z)$ 能满足同一组实测重力值.其他位场方法(磁法、直流电法等)也具有类似的特性^{[1]①}.

其二是资料的不充分、不精确.例如地震法,在地壳介质是完全弹性的,数据绝对精确、充分理想的情况下,其反演结果应是唯一的.但问题是实际地下介质并非均一,所采集数据的质和量都是有限的,因而其反演结果是非唯一性的.其他地球物理方法也存在类似问题^[2].

因此,单一地球物理数据的反演解释结果难于满足科学研究的需要.建立综合地球物理模型,对多种地球物理资料进行综合分析可以弥补单一方法的不足.

建立综合地球物理模型,就是要求得地下介质的一组物性参数,使得它满足于所采集的每一种地球物理数据.从数学上讲,每一种地球物理数据的反演结果都是一个无限多组解的集合,而综合地球物理模型的解则是各种地球物理数据反演解集合的交集.这样一来,解的范围大大地缩小了,更有利于解的应用.

本文1996年6月13日收到

第一作者简介:郭守年,男,1940年2月生,副研究员,主要从事地壳形变和深部地球物理研究工作.

① 李雄.地震-重力联合反演——不同的实现方式.见:全国青年测绘工作者优秀论文集,中国测绘学会编,1992.1~5.

另外,各种地球物理方法对物性分辨率是不一样的,用多种方法进行综合解释能取长补短,充分挖掘数据所包含的丰富信息,使所建立的综合模型更符合实际。

本文尝试对天水地震区建立综合地球物理剖面,进而研究该地区的壳幔结构。

2 建立综合地球物理剖面的方法

综合地球物理剖面是建立在各种方法的几何或物性参数之间相沟通、转换和相互约束的基础之上的。各种不同的地球物理场之间,有的具有同源性,例如人工地震和重力资料。理论和实际测量均已证明,组成岩石圈介质的速度和密度都取决于其岩性、孔隙度及压力等因素,密度差异往往伴随着速度的差异,因此,地震和重力的资料具有同源性,所以可用这两种资料建立综合地球物理剖面。

用地震和重力资料建立综合剖面,我们采用了序贯反演的方法。首先是地震资料的反演,得出研究区的二维速度模型,然后把速度值按照伯奇的速度-密度实验公式^[3]

$$\rho = 0.768 + 0.301 v_p \quad (2)$$

转换为密度, v_p 单位为 km/s, ρ 单位为 g/cm³。深度结果就作为重力初始模型的深度,然后进行重力反演,计算出各层密度和深度,再用这样的深度和由密度转换来的速度,再做地震反演,如此交替反演,相互印证,直至模型参数都较好地拟合了两种资料为止。其工作流程如图1所示。

对于大地电磁和地热的资料,我们采取了类似的办法,因为理论和实践都表明,电阻率与温度的关系比较密切。对于组成大陆地壳及上地幔的结晶岩来说,温度是影响电导率的最灵敏的因素,其关系可简化为

$$\sigma = \sigma_0 \exp(-E_0/KT) \quad (3)$$

式中 E_0 为活化能, σ_0 为指数前系数, K 为波尔兹曼常数, T 为绝对温度。一般地说 E_0 和 σ_0 是温度和围压的函数,随温度的升高而增大。当然电导率还受其他各种因素的影响,其中主要的还有岩石结构、含水量、压强和物质组成的影响,但是由于关系复杂,这次建立综合模型暂不考虑这些因素。

具体计算时还应用了匈牙利学者 Adam 所建立的热流与高导层埋深的统计公式^[4]。

$$h = h_0 q^{-a} \quad (4)$$

对于壳内高导层, $h_0 = 35$ km, $a = 1.30$; 对于上地幔高导层, $h_0 = 155$ km, $a = 1.46$, q 为大地热流值,单位为 HFU。

在求得大地热流之后,按一维稳态热传导公式^[5]

$$T_h = T_0 + qh/K - Ah^2/2K \quad (5)$$

计算埋深 h 处的温度 T_h 。式中 T_0 为各层段的表面温度, q 为各层段的表面热流, K , A 为各层段岩石热导率和生热率。

利用大地电磁资料和地热资料建立综合模型的工作流程如图2所示。

建立上述二个模型所用的参数不属于同源地球物理场。例如,低速层并不都是高导层,密

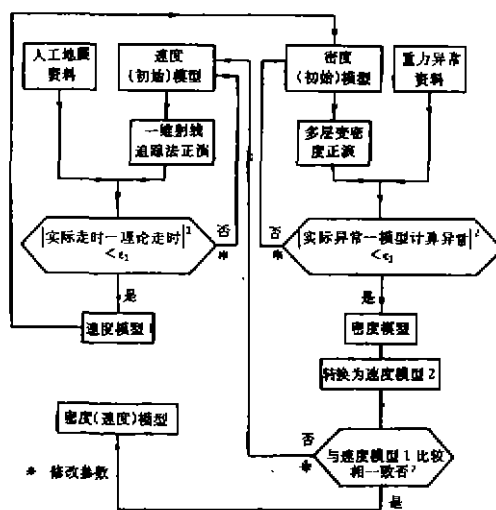


图1 人工地震和重力异常资料联合反演流程图

Fig.1 Flow diagram of combined inversion based on the data of deep seismic sounding and gravity anomaly.

度界面不一定是电性界面,但是,它们又都是同一地区地下介质在不同地球物理场的不同反映,是同一事物的不同侧面,相互之间还是有一定的联系的.例如,莫霍面是非常明显的速度-密度界面,而在电性模型上有的区域有显示,有的区域没有反映出来.这很可能是上下层位的电阻率相近,大地电磁资料没有分辨出来.我们在综合上述二种模型时,采取了以下原则:

(1) 当二种模型参数中的深度比较一致时,采用一种模型的深度参数,并正演另一种模型,看其差异是否能接受;(2) 当二种模型参数中的深度不一致时,保留二种模型的不同界面;(3) 当两种模型的参数有明显矛盾时,应寻求原因,能消除则消除,不能消除时则暂时保留,留待以后研究.

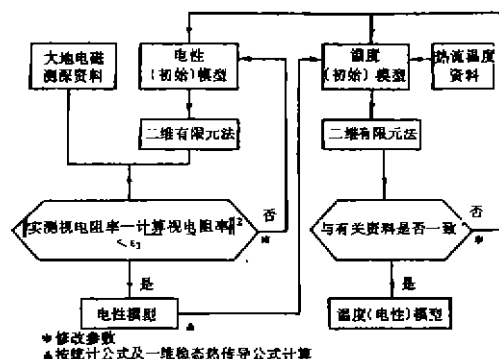


图2 大地电磁与地热资料联合反演流程图

Fig.2 Flow diagram of combined inversion based on the data of magnetotelluric and geotherm.

3 天水地震区综合地球物理剖面的建立及模拟结果分析

天水地震区位于南北地震带北段,历史上曾发生过多级7级以上大震,地质构造复杂.在大地构造位置上,该地区处于华北地块、扬子地块和青藏高原块体的交汇地带.在这一地区先后开展了一些深部地球物理探测工作,如图3所示.

1986年在水地震区开展了人工地震测深工作.主要有二条测线,其一是东西测线,西起甘肃夏河县阿木去乎,经由临潭、漳县、秦安、张家川、陕西陇县,止于甘肃灵台县独店,全长

460 km,共设150个测点.其二是南北测线,南起甘肃成县,经由天水、秦安、静宁,止于宁夏西吉夏寨,全长244 km,共设125个测点.文献[6]和[7]给出了二条测线范围内的地壳分层速度结构.

为配合天水地震区深部综合研究的需要,1990年兰州地震研究所在该测区沿上述二条剖面布设了重力测线.东西向重力剖面西起漳县高家沟,东至张家川县城,全长178 km,共设45个测点;南北向剖面南起成县折家庄,北至秦安张家坡,全长138 km,共设31个测点.文献[8]给出了观测结果.

1990年兰州地震研究所使用德国 Metronix 公司的 MMS-

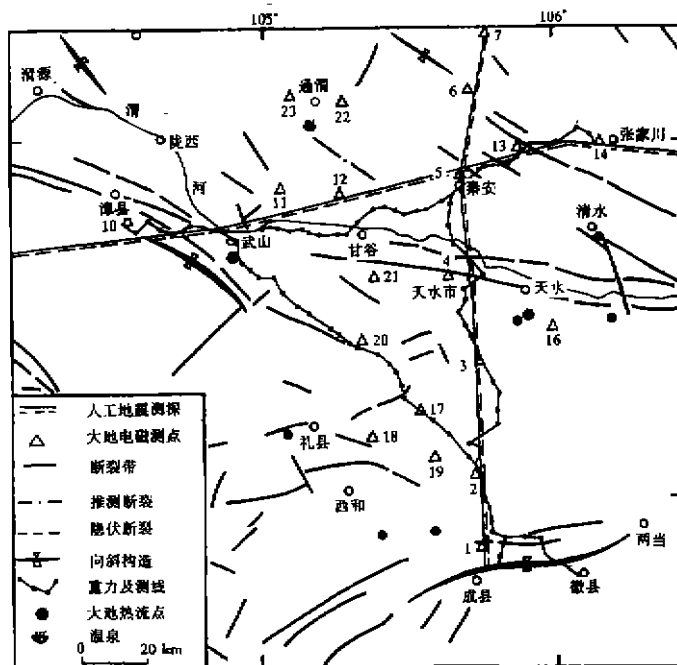


图3 天水地震区深部地球物理资料分布图

Fig.3 Distribution of deep geophysical data in Tianshui earthquake area.

02E型数字大地电磁测量系统完成了22个测点的资料采集工作。其中沿东西向测线7个测点,长210 km;沿南北向测线共8个测点,长230 km。资料的观测周期为0.25~2730秒。在室内资料处理时,对资料段进行了筛选、圆滑和静校正,在进行一维解释时,注意选择合理的解释曲线(朱佐全等,1993)^②。

根据观测资料和一维解释结果,我们用有限元法进行了二维正演工作^[9]。数学模型及其方程略去。为了减少单元节点数和计算量,采用二次插值的有限元方法^[10],在微机上用Fortran语言编制了程序,且与两个理论模型的结果进行了比较。

在北纬33°~37°和东经102°~108°地区共完成了20多个钻孔的系统测量,收集了石油、煤炭等部门的地温资料,测试了200多块岩石的热导率,取得了36个质量较高的大地热流值(梁恕信等,1992)^③。但由于我们这次建立模型的区域较小,实际仅仅用到天水、清水、礼县、西和及成县等8个测点的资料^[11]。地温场计算见文献[12]。

根据上述建立综合地球物理模型的工作流程和所获取的地球物理资料,我们建立了天水地震区二个剖面的二维综合地球物理剖面图,如图4和图5所示,其重力资料见图6。

图4是灵台-阿木去乎东西向的二维综合地球物理剖面。从图中可以看出,首先是速度和密度分布表现出很好的一致性,纵波速度高,相应的密度也大;低速层相应于低密度层,界面的深度也有较好的一致性,这也反应了这二种资料的同源性。

整个剖面可分东、中和西三段。东段属鄂尔多斯地台区,它是一个构造上相对完整且相对稳定的构造单元^[13,14]。我们所获得的各种地球物理资料也说明了这一点,尽管东段横穿地台西部的一部分。该段基底埋深较厚,最大处可达5.5 km。

组成基底的岩层为前震旦纪深变质岩系,上覆二叠纪、白垩纪及中、新生代沉积层。上地壳底面平缓,埋深约18~20 km。上地壳厚度13~17 km,由古生代和中生代的未变质沉积盖层以及中晚元古代的地层组成。中地壳深约27~31 km,由局部混合岩化的角闪岩相变质岩组成,推

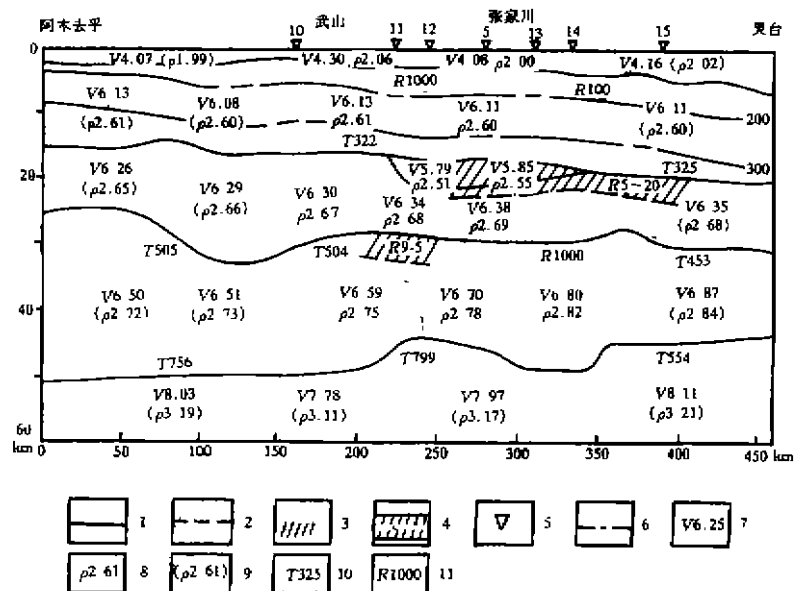


图4 灵台-阿木去乎东西向二维综合地球物理剖面图

Fig. 4 2-D Comprehensive geophysical section in Lingtai-Armuquhu.

1 速度-密度界面; 2 电性界面; 3 低阻层;

4 与速度-密度界面重合的低阻层顶部或底部;

5 大地电磁测深点位和点号; 6 地温等值线及温度(°C);

7 纵波速度为6.25 km/s; 8 密度为2.61 g/cm³; 9 由速度转换的密度;

10 界面的温度(°C); 11 电性层电阻率(Ω·m)

② 朱佐全,等.天水地区及邻区地壳上地幔电性结构的大地电磁解释,1993.

③ 梁恕信,等.天水地震区大地热流及岩石圈热结构,1992.

测主要是早元古界和太古界变质岩,下地壳底面即莫霍面埋深 44~45 km,变化平缓,起伏不大,推测主要由相对均匀的麻粒岩相岩石组成。莫霍面的温度为 550°C 左右,比中、西段莫霍面上温度明显偏低,反映了古老稳定地台的特点。上地幔第一个高导层顶面埋深约 105 km。利用高导层埋深按(4)式计算的大地热流值为 58.5 mW/m²,与实测结果基本一致^③。

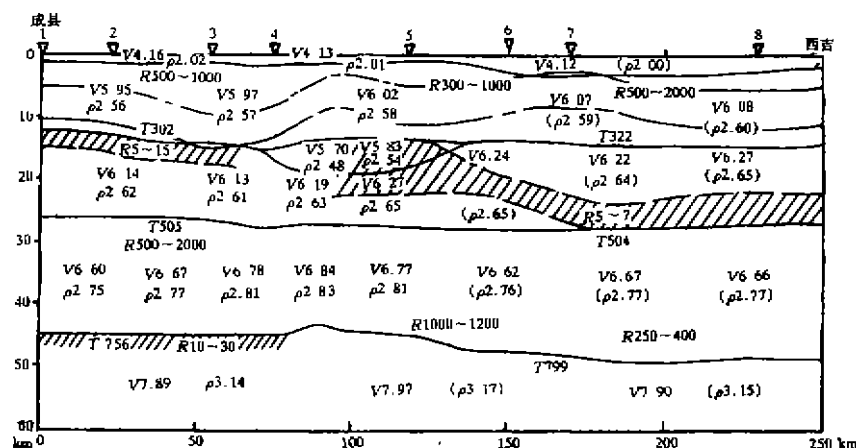


图5 成县-西吉南北向二维综合地球物理剖面图

Fig. 5 2-D comprehensive geophysical section in Chengxian-Xiji.

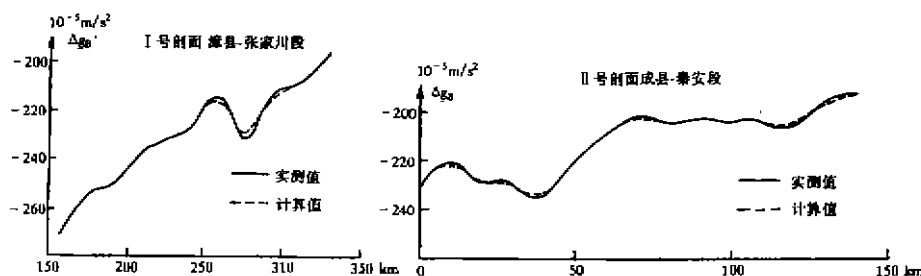


图6 I号和II号剖面的重力异常资料

Fig. 6 Gravity anomalies of profile I and II.

总之,该构造单元深部结构横向变化小,地表构造相对简单,这与其在长期的地质历史中以整体抬升和拗陷运动为主是相一致的。

中段属祁连地槽区。从各种地球物理资料来看,其地下介质各向异性明显,地下结构复杂。该段基底埋深较浅,在 2 km 左右,主要是上元古界和下古生界地层组成的褶皱基底。秦安地区基底埋深为 1 km,由结晶片岩、中基性火山岩和基性、超基性火山岩组成。上地壳底面埋深 16~18 km,厚度为 14~16 km,由一套下古生界浅变质岩系组成。中地壳底面埋深 28~29 km。下地壳底面即莫霍面埋深 44~49 km,起伏较大,在武山至秦安一带莫霍面上隆 4~5 km,温度为 760°C。在电性结构上,壳内高导层发育,在中地壳上部(16~23 km)、下地壳上部(27~33 km)均有壳内高导层存在。上地幔第一高导层顶面埋深 96~105 km。

由于软流圈顶面埋深稍浅,该段岩石圈稍薄,有利上地幔热物质上涌,造成莫霍面温度增高并上隆,有利于深部热流引起地壳中部岩石的相变脱水反应,形成局部熔融状态,导致该段中高导层、低速层、低密度层的同步出现,而晚第三纪以来,青藏块体北东向的挤压作用又加强了这一过程。

西段属于秦岭地槽区,基底埋深1~2 km,主要是海相三叠系、石炭系地层.上地壳底面埋深变化不大,中地壳界面变化比较剧烈,莫霍面缓慢变深,从47 km 逐渐变到51 km.由于西段大地电磁、重力、航磁、地热资料都比较少,剖面图上只能是一个大体的轮廓.

三段的地球物理参数详见表1.

表1 灵台-阿木去乎剖面的地球物理参数分布统计表

层位	地球物理参数	东段 鄂尔多斯地台	中段 祁连地槽区	西段 秦岭地槽区
沉积层	纵波速度 v (km/s)	4.16	4.31-4.06	4.07 ~ 4.08
	底面埋深 H (km)	2 ~ 5.5	1 ~ 2.5	1 ~ 2
	密度 ρ (g/cm ³)	2.02	2.07 ~ 1.99	1.99 ~ 2.00
	底面温度 T (°C)	104	75	48
上地壳	底面埋深 H	18 ~ 20	16 ~ 18	14 ~ 16
	纵波速度 v	6.11	6.11 ~ 6.13	6.08 ~ 6.13
	密度 ρ	2.60	2.60 ~ 2.61	2.60 ~ 2.61
	底面温度 T	325	322	302
中地壳	底面埋深 H	27 ~ 31	28 ~ 29	24 ~ 34
	纵波速度 v	6.33 ~ 6.35	6.30 ~ 6.38	6.26 ~ 6.29
	密度 ρ	2.67 ~ 2.68	2.67 ~ 2.69	2.65 ~ 2.66
	底面温度 T	453	504	505
下地壳	底面埋深 H	44 ~ 45	44 ~ 49	49 ~ 51
	纵波速度 v	6.81 ~ 6.87	6.59 ~ 6.80	6.50 ~ 6.51
	密度 ρ	2.82 ~ 2.84	2.75 ~ 2.82	2.72 ~ 2.73
	底面温度 T	554	799	756
壳内低阻层	顶面埋深 h (km)	18 ~ 20	16 ~ 28	无测点
壳内低速层	顶面埋深 h	无	15 ~ 17	无
	厚度 Δh	无	4 ~ 5	无
	纵波速度 v	无	5.79 ~ 5.85	无

图5是成县-西吉的南北向剖面的二维综合地球物理剖面图.该剖面可分为三段,从成县到天水为南段;天水至秦安为中段;秦安至西吉为北段.

南段属秦岭地槽区,沉积层厚约1~2 km.上地壳底面埋深为11~15 km,变化较大,由南向北逐渐加深.上地壳的纵波速度平均为5.95 km/秒,平均密度为2.56g/cm³,与中段、北段相比较,数值上较低,而且对中、下地壳而言,情况也类似,具体见表2.这也反映了秦岭地槽与祁连地槽在地壳结构上的差异.莫霍面埋深44~45 km,中、下地壳之间的界面为26~27 km,变化都不大.该段电性结构的一个显著特点是壳内高导层顶面与中地壳顶面埋深基本一致,约11~14 km,电阻率为5~15 $\Omega \cdot m$.

中段横跨了西秦岭北缘断裂带,进入了祁连地槽区.在深部结构方面有二个显著特点:一是莫霍面上隆,相对变浅2~3 km;二是在上中地壳之间,在14~20 km深度上有一低速度、低密度层,纵波速度为5.70~5.83 km/s,密度为2.48~2.52 g/cm³,比上地壳、中地壳的速度、

密度都低.

北段属于祁连地槽区, 沉积层厚度为 2~4 km, 比中、南段稍厚. 上、中地壳底面埋深分别为 14~15, 27~28 km, 变化不大, 形态平缓. 莫霍面埋深由 45 km 向北逐渐加深, 直至 49 km.

从整条剖面来看, 中段横切西秦岭北缘断裂带, 莫霍面上隆. 中地壳内有低速层存在, 其内高导层和上地幔第一高导层在跨越该断裂带处有所间断, 两侧的速度、密度、电导率和温度等地球物理参数有不同程度的差异. 与此相对应, 在甘谷-天水一带有超基性岩出露, 这些均反映出该断裂是一条超壳断裂, 是祁连地槽和秦岭地槽之间的一条分界线.

表2 成县-西吉剖面的地球物理参数分布统计表

层位	地球物理参数	南段	中段	北段
		秦岭地槽	祁连地槽	
沉积层	底面埋深 H (km)	1 ~ 2	1 ~ 2	2 ~ 4
	纵波速度 v (km/s)	4.16	4.13	4.12
	密度 ρ (g/cm ³)	2.02	2.01	2.01
	底面温度 T (°C)	48	75	
上地壳	底面埋深 H	11 ~ 15	14 ~ 15	14 ~ 15
	纵波速度 v	5.94 ~ 5.97	6.02 ~ 6.03	6.07 ~ 6.08
	密度 ρ	2.56 ~ 2.57	2.58	2.59
	底面温度 T	302	322	
中地壳	底面埋深 H	26 ~ 27	26 ~ 28	27 ~ 28
	纵波速度 v	6.13 ~ 6.14	6.19 ~ 6.27	6.22 ~ 6.27
	密度 ρ	2.62	2.63 ~ 2.65	2.64 ~ 2.65
	底面温度 T	505	504	
下地壳	底面埋深 H	44 ~ 45	43 ~ 46	46 ~ 49
	纵波速度 v	6.60 ~ 6.78	6.77 ~ 6.84	6.62 ~ 6.67
	密度 ρ	2.75 ~ 2.81	2.81 ~ 2.83	2.76 ~ 2.77
	底面温度 T	756	799	
壳内低阻层	顶面埋深 h (km)	11 ~ 14	15 ~ 20	18 ~ 25
壳内低速层	顶面埋深 h	无	15 ~ 17	无
	厚度 Δh	无	5	无
	纵波速度 v	无	5.70 ~ 5.83	无

4 讨论

(1) 研究具有多种地球物理物理资料的地区的深部构造时, 综合多种资料, 进行正演和反演计算是必要的, 它能在一定程度上缩小多解性的范围.

(2) 对于不同的地球物理资料, 联合反演的效果是不同的. 对于同源的资料, 例如人工地震和重力, 二者联合反演的效果好, 能得出比较一致的地球物理剖面; 对于不同源的资料, 例如象速度和电性, 有时共同的界面难以找到, 因而效果不明显.

(3) 二条二维剖面都横穿了西秦岭北缘断裂带. 当跨越该断裂带时, 都出现了莫霍面上隆、地壳变薄、低速层、低密层、低阻层位同步出现等地球物理参数的显著变化, 而且都有超基

性岩出露,这些都说明该断裂带是超壳断裂带.同时在断裂带附近形成了宽度为几十到上百公里的相变过渡带,表明其影响深度可达上地幔.

(4) 该断裂带及其两侧发生了多次强震,地震带的宽度和相变过渡带宽度相近,震源优势深度与地壳中部低速、低密、低阻层埋深相吻合.这正是区域地壳应力的连续作用下,地质构造长期活动所造成的岩石破碎及介质结构变形的结果.

参考文献

- 1 吴功建,等.地球物理方法及其在地质和找矿中的应用.北京:地质出版社,1988.1~3.
- 2 朱介寿.地震学中的计算方法.北京:地震出版社,1988.2~5.
- 3 张少泉.地球物理学概论.北京:地震出版社,1986.179.
- 4 Adam A. Geothermal effects in the formation of electrically conducting zone and temperature distribution in the earth. *Physics Earth Planet Inter*, 1978, 17: 21~28.
- 5 Turcotte D L, 等.韩贝传等译.地球动力学.北京:地震出版社,1986.132~134.
- 6 闵祥仪,等.灵台-阿木去乎剖面地壳速度结构.西北地震学报,1991,13(增刊):29~36.
- 7 李清河,等.成县-西吉剖面地壳速度结构.西北地震学报,1991,13(增刊):37~43.
- 8 郭守年,等.天水地区重力剖面测量结果和地壳结构.西北地震学报,1995,17(1):43~49.
- 9 陈乐寿,等.大地电磁测深研究.北京:地震出版社,1984.208~217.
- 10 胡建德,等.用三角形二次插值有限元方法计算二维大地电磁测深曲线.石油地球物理勘探,1984,(4):358~367.
- 11 张必敷,等.南北地震带北段地温场的初步探讨.西北地震学报,1987,9(1):26~32.
- 12 董治平,等.天水地震区深部地温场的有限元计算.西北地震学报,1996,18(3):48~53.
- 13 《中国岩石圈动力学地图集》编委会.中国岩石圈动力学概论.北京:地震出版社,1991.12~39.
- 14 国家地震局《鄂尔多斯周缘活动断裂系》课题组.鄂尔多斯周缘活动断裂系.北京:地震出版社,1988.5~19.

ESTABLISHMENT OF COMPREHENSIVE GEOPHYSICAL SECTION AND CRUST-MANTLE STRUCTURE IN TIANSHUI EARTHQUAKE AREA

GUO Shounian DONG Zhiping JIANG Mei LIAO Zefu

(*Earthquake Research Institute of Lanzhou, SSB, Lanzhou 730000*)

Abstract

Based on the data of deep seismic sounding, gravity, magnetotelluric sounding and geotherm, two comprehensive geophysical sections are established in Tianshui earthquake area. Analysing the two sections, crust-mantle structure in the Tianshui area are studied. The results show that crustal thickness along fault zone in the north edge of western Qinling is thin, and low velocity layer, low density layer and low resistivity layer synchronously exist there. The facies change transition zones of tens to a hundred kilometers in width and up to upper mantle in depth exist on the both sides of the fault zone, which means that depth of the fault zone possibly is up to upper mantle.

Key words: Gansu, Geophysical profile, Crust-mantle structure, Tianshui earthquake area